

文章编号 1004-924X(2009)07-1553-08

火箭喷管三维运动测试的校准装置及误差分析

刘 博, 叶 东, 车仁生

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 火箭发动机喷管三维运动参数的测试是对其精确控制的前提, 其校准装置是保证测试精度的关键。本文提出了一种能够直接模拟火箭喷管实际运动并提供标准的位置和运动参数的校准装置, 用于火箭喷管三维运动测试的静态和动态校准。在分析火箭喷管运动的基础上, 设计了一种新型校准装置的结构。该装置主要由基座、升降台、摇摆台以及喷管标准件组成; 具有三个自由度, 分别为绕 X 轴和 Y 轴的摆动, 以及 Z 轴方向的直线移动。应用多体系统运动学误差理论推导了几何误差源影响校准装置的指向误差和摆心位置误差的公式, 分析了几何误差的来源。通过仿真得出了指向误差和摆心位置误差在喷管摆动范围内的分布, 指出为满足校准精度, 对指向误差影响较大的垂直度误差应控制在 $15''$ 之内, 对摆心位置误差影响较大的相交度误差应控制在 $80 \mu\text{m}$ 以内。

关键词: 火箭喷管; 运动测试; 校准装置; 多体系统; 误差分析

中图分类号: V233; V471 **文献标识码:** A

Calibration equipment for rocket nozzle motion testing and its error analysis

LIU Bo, YE Dong, CHE Ren-sheng

(*Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The 3D motion parameter measurement of a rocket motor nozzle is a premiss for accurately controlling the nozzle, and the calibration equipment is the key to ensure motion testing at a high precision. To test accurately 3D motion parameters, this paper proposes a new calibration equipment to directly simulate the actual motion of the rocket motor nozzle and to supply the standard position and motion parameters for static and dynamic calibrations. After analyzing the motion of the rocket motor nozzle, a new mechanism consisting of a base, a lifting table, a swing table and a standard nozzle model is proposed, which concludes three degrees of freedom, rotation on X and Y coordinate axes, lifting on Z coordinate axis. The terminal error expression is derived by the theory of multi-system kinematic error in consideration of the geometric errors effect on pointing errors and nozzle center position errors, then the origin of geometric errors is analyzed. By the simulated results, the distribution states of pointing errors and center position errors in rotation ranges are obtained. On the basis of the obtained results, it suggests that the orthogonality errors mostly influencing pointing errors should be

收稿日期: 2008-11-07; 修订日期: 2009-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50275040)

controlled below $15''$, and the axis intersection errors mostly influencing center position errors should be controlled below $80 \mu\text{m}$.

Key words: rocket nozzle; motion testing; calibration equipment; multi-system; error analysis

1 引言

发动机喷管姿态的精确控制对控制飞行器运行姿态、提高目标命中精度等具有重要意义^[1],而对火箭发动机喷管运动的三维参数测试则是对其精确控制的前提。

应用基于离散特征的立体视觉测试技术测试火箭喷管的三维运动参数是一种新方法^[2-3],其校准装置是保证测试精度的关键^[4]。本文提出的校准装置实际上是一个标准运动发生器,其能够模拟火箭喷管的实际运动,并提供标准的位置和运动参数,用于视觉测试系统的静态和动态校准。静态校准过程中提供的主要是喷管的标准位置和姿态参数;动态校准过程提供的则是速度、加速度、角速度、角加速度等运动参数。校准装置的不确定度应该是被校准的视觉测试系统不确定度的 $1/5 \sim 1/10$,并且其提供的运动参数的量值可溯源到长度和时间基准。本文将对校准装置的结构及其定位和定向的误差分析做重点研究。

2 校准装置结构

2.1 火箭喷管运动分析

火箭喷管的种类很多,按其与发动机的连接方式分类,可分为刚性喷管、柔性喷管、以及弹射喷管,其中刚性喷管应用最为广泛。图 1 为典型的全轴摆动轴承式活动喷管,其与发动机之间采用刚性轴承连接,即喷管固定座与活动件之间用滚珠和相应的密封件相连。由两个相互垂直安装的伺服机构带动整个喷管相对于发动机纵轴偏一个角度产生侧向推力,从而实现火箭俯仰和偏航的控制,使其能在 360° 的方位上进行全轴摆动。柔性喷管和弹射喷管与刚性喷管的工作原理类似,只是柔性喷管没有刚性的轴承连接,而弹射喷管则是在轴向弹出后再进行全轴摆动。喷管的转动轴线与发动机纵轴的交点称为摆心。喷管摆动时,摆心会发生一定的偏移,特别是对于柔性喷管而言,摆心偏移量很大。综上所述,火箭喷管的运

动主要包括俯仰和偏航转动,以及轴向的移动。

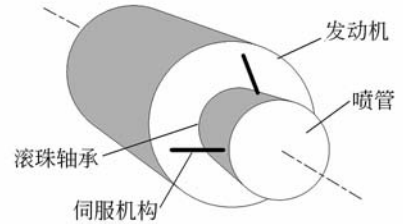


图 1 火箭喷管结构简图

Fig. 1 Structure of rocket adjustage

2.2 校准装置

结合喷管的运动分析,本文提出了一种双轴摇摆-直线升降的结构。如图 2 所示,该装置主要由基座、升降台、摇摆台以及喷管模型组成。具有三个自由度,分别为绕 X 轴和 Y 轴的摆动,用来模拟火箭喷管的偏航和俯仰运动;以及 Z 轴方向的直线移动,用来模拟火箭喷管沿轴向的运动。作为标准件的喷管模型安装于内框(为方便说明后文简称为喷管)。负载喷管时,绕 X 轴转动的偏航角范围为 $\pm 90^\circ$,绕 Y 轴转动的俯仰角范围为 $\pm 30^\circ$ 。内外框框体结构采用精密机械轴系支撑的高强度铸造铝合金框架,传感器采用具有基准位置编码信号的光电增量式编码器作为转动角度测量反馈元件,内外轴采用直流力矩电机驱动。升降台由台体、滚珠丝杠、线性滑轨、机械限位装

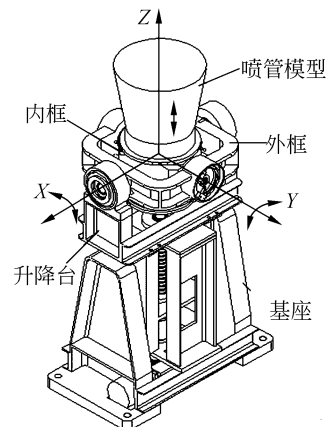


图 2 校准装置结构图

Fig. 2 Structure of calibration equipment

置等组成,由螺栓螺母与双轴摇摆台连接。轨道为双直线导轨,位置传感器采用线光栅尺。 Z 轴由伺服电机经减速机构驱动滚珠丝杠,采用的减速机构为具有自锁功能的蜗杆副减速器。校准装置以 PC 工控计算机为基础,结合 DSP 三轴运动控制器技术来实现数字式位置伺服控制。

3 误差模型的建立

本文建立的校准装置的误差模型指的是喷管轴线的指向误差和喷管摆心位置误差的模型。影响这两项误差的误差源有很多,包括零部件的制造误差、装配误差、测量系统误差、受力变形、热变形、自身振动以及环境影响等^[5]。其中制造误差、装配误差以及测量系统误差合称为几何误差,其为指向误差及摆心位置误差的主要来源。下面将分析几何误差对指向误差和摆心位置误差的影响。

3.1 坐标系的建立

将校准装置抽象成多体系统建立坐标系^[6],如图 3 所示。基座坐标系 0,此坐标系与大地固连,选定基座安装平面的中心为坐标系原点;升降台坐标系 1,坐标系原点为升降台与外框安装轴线的中心;外框坐标系 2(pitch),坐标系原点位于外框与内框平均轴线公垂线段与外框平均回转轴线的交点上;内框坐标系 3(yaw),坐标系原点位于外框与内框平均轴线的公垂线段与内框平均回转轴线的交点;喷管坐标系 4,坐标系原点位于喷管安装平面的中心。

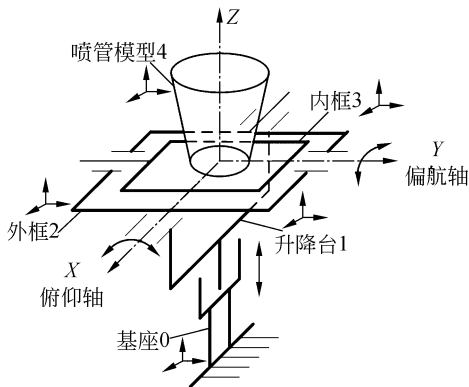


图 3 校准装置的原理示意图

Fig. 3 Sketch map of calibration equipment principle

3.2 校准装置的误差建模

由多体系统运动学误差理论可知^[7],多体系统中的相邻体间的理想特征矩阵 $T_{ijideal}$ 和实际特征 T_{ij} 矩阵分别为:

$$T_{ijideal} = T_{ijp} \cdot T_{ijs}, \quad (1)$$

$$T_{ij} = T_{ijp} \cdot \Delta T_{ijp} \cdot T_{ijs} \cdot \Delta T_{ijs}, \quad (2)$$

其中, T_{ijp} 为低序体坐标系与高序体坐标系静止时的理想位姿变换矩阵, ΔT_{ijp} 为低序体坐标系与高序体坐标系静止时的位姿误差变换矩阵, T_{ijs} 为低序体坐标系运动时的理想位姿的变换矩阵, ΔT_{ijs} 为低序体坐标系运动时的位姿误差变换矩阵。如图 4 所示, B_i 坐标系 $X_i Y_i Z_i$ 经过 4 次变换后得到 B_j 的坐标系 $X_j Y_j Z_j$ 。

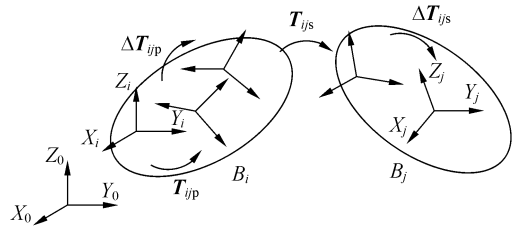


图 4 有误差的情况下相邻体 B_i 和 B_j 的空间位姿关系

Fig. 4 Position-pose relation between B_i and B_j with errors

当 B_j 相对于 B_i 作单自由度运动(移动或转动),并且 12 个误差项很小时(静止和运动时的位姿误差各 6 项),可得 ΔT_{ijp} 和 ΔT_{ijs} 如下^[8]:

$$\Delta T_{ijp} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ijp} & \Delta\beta_{ijp} & \Delta x_{ijp} \\ \Delta\gamma_{ijp} & 1 & -\Delta\alpha_{ijp} & \Delta y_{ijp} \\ -\Delta\beta_{ijp} & \Delta\alpha_{ijp} & 1 & \Delta z_{ijp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\Delta T_{ijs} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ijs} & \Delta\beta_{ijs} & \Delta x_{ijs} \\ \Delta\gamma_{ijs} & 1 & -\Delta\alpha_{ijs} & \Delta y_{ijs} \\ -\Delta\beta_{ijs} & \Delta\alpha_{ijs} & 1 & \Delta z_{ijs} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

根据所建立的坐标系,忽略误差极小项,得到基座 0 和升降台 1 的变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{01s} & \Delta\beta_{01s} & \Delta x_{01s} \\ \Delta\gamma_{01s} & 1 & -\Delta\alpha_{01s} & \Delta y_{01s} \\ -\Delta\beta_{01s} & \Delta\alpha_{01s} & 1 & \Delta z_{01s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 z_0 为升降台的高度, z 为升降台升降的位移。摇摆台外框 2 和升降台 1 的变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{12p} & \Delta\beta_{12p} & \Delta x_{12p} \\ -\Delta\gamma_{12p} & 1 & 0 & \Delta y_{12p} \\ -\Delta\beta_{12p} & 0 & 1 & \Delta z_{12p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{12s} & \Delta\beta_{12s} & \Delta x_{12s} \\ \Delta\gamma_{12s} & 1 & -\Delta\alpha_{12s} & \Delta y_{12s} \\ -\Delta\beta_{12s} & \Delta\alpha_{12s} & 1 & \Delta z_{12s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 α 为喷管绕 X 轴转动的俯仰角 (pitch angle)。摇摆台内框 3 和外框 2 的变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{23p} & 0 & \Delta x_{23p} \\ \Delta\gamma_{23p} & 1 & -\Delta\alpha_{23p} & \Delta y_{23p} \\ 0 & \Delta\alpha_{23p} & 1 & \Delta z_{23p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{23s} & \Delta\beta_{23s} & \Delta x_{23s} \\ \Delta\gamma_{23s} & 1 & -\Delta\alpha_{23s} & \Delta y_{23s} \\ -\Delta\beta_{23s} & \Delta\alpha_{23s} & 1 & \Delta z_{23s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 β 为喷管绕 Y 轴转动的偏航角 (yaw angle)。喷管 4 和内框 3 的变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{34p} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_{34p} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

将(5)(6)(7)(8)相乘得到校准装置上喷管相对于基座的实际位姿矩阵为:

$$\mathbf{T}_{04} = \mathbf{T}_{01} \cdot \mathbf{T}_{12} \cdot \mathbf{T}_{23} \cdot \mathbf{T}_{34}. \quad (9)$$

校准装置上喷管的理想位姿矩阵为

$$\mathbf{T}_{04ideal} = \mathbf{T}(z_0) \cdot \mathbf{T}(z) \cdot \mathbf{T}(\alpha) \cdot \mathbf{T}(\beta) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & z_0 + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

则喷管位姿的误差模型为

$$\mathbf{E}_{04} = \mathbf{T}_{04} - \mathbf{T}_{04ideal}, \quad (11)$$

首先考虑校准装置的指向误差。所谓指向误差指的是喷管的中心轴线上的单位向量, 经过旋转和平移后, 预期指向与实际指向的偏差^[9]。指向误差实际上是一种空间角度误差, 标志着喷管姿态定位精度^[10]。可设固连在喷管中心轴线上的单位向量为 $[0, 0, 1, 0]'$, 则指向误差为

$$[\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, 1]' = \mathbf{E}_{04} \cdot [0, 0, 1, 0]'. \quad (12)$$

摆心位置误差也是一项重要的精度指标, 其对于视觉测试系统的校准具有重要的意义。所谓

摆心位置误差指的是喷管的安装平面中心, 经过旋转和平移后, 预期位置与实际位置的偏差。设喷管的摆心为 $[0, 0, 0, 1]'$, 则摆心位置误差为

$$[\Delta x, \Delta y, \Delta z, 1]' = \mathbf{E}_{04} \cdot [0, 0, 0, 1]'. \quad (13)$$

4 几何误差源分析

由式(5)(6)(7)(8)可知, 全部几何误差分量共 30 项, 影响指向误差及喷管摆心位置误差的主要误差源有三方面, 构件的装配误差, 直线升降误差和轴系回转误差, 以及光栅和光电编码器的测

量误差。

4.1 装配误差

装配误差包括升降台、内外框以及喷管的装配角度和位置误差,属于静止误差,共 12 项。如表 1 所示,下标为 p 的误差项均为装配误差。

表 1 校准装置几何运动误差

Tab.1 Geometrical motion errors of calibration equipment

符号	误差类型	符号	误差类型
$\Delta\alpha_{01s}$	升降台绕 X 向角摆误差	ΔY_{12s}	外框 Y 径向回转误差
$\Delta\beta_{01s}$	升降台绕 Y 向角摆误差	Δz_{12s}	外框 Z 径向回转误差
$\Delta\gamma_{01s}$	升降台绕 Z 向角摆误差	$\Delta\alpha_{23p}$	内框 Y、Z 向垂直度误差
Δx_{01s}	升降台 XZ 面直线度误差	$\Delta\gamma_{23p}$	内框 X、Y 向垂直度误差
Δy_{01s}	升降台 YZ 面直线度误差	Δx_{23p}	内框 X 向相交度误差
Δz_{01s}	升降台 Z 向测量误差	Δy_{23p}	内框 Y 向相交度误差
$\Delta\beta_{12p}$	外框 X、Z 向垂直度误差	Δz_{23p}	内框 Z 向相交度误差
$\Delta\gamma_{12p}$	外框 X、Y 向垂直度误差	$\Delta\alpha_{23s}$	内框 X 向倾角回转误差
Δx_{12p}	外框 X 向相交度误差	$\Delta\beta_{23s}$	内框角度测量误差
Δy_{12p}	外框 Y 向相交度误差	$\Delta\gamma_{23s}$	内框 Z 向倾角回转误差
Δz_{12p}	外框 Z 向相交度误差	Δx_{23s}	内框 X 向径向回转误差
$\Delta\alpha_{12s}$	外框角度测量误差	Δy_{23s}	内框 Y 向轴向误差
$\Delta\beta_{12s}$	外框 Y 向倾角回转误差	Δz_{23s}	内框 Z 向径向回转误差
$\Delta\gamma_{12s}$	外框 Z 向倾角回转误差	Δx_{34p}	喷管 X 向装配位置误差
Δx_{12s}	外框 X 向轴向误差	Δy_{34p}	喷管 Y 向装配位置误差

4.1.1 垂直度误差

轴线垂直度误差实际上是装配角度误差,其对指向误差的影响很大,因此轴线的垂直度是很重要的精度指标^[11]。本文在误差分析过程中均将轴系之间垂直度看成不受回转误差影响的平均轴线之间的误差项目,受轴转角位置及晃动量的影响可在回转误差中体现。如图 5 所示,外框与内框 X、Y 向垂直度误差 $\Delta\gamma_{23p}$ 。以及 $\Delta\beta_{12p}$, $\Delta\gamma_{12p}$, $\Delta\alpha_{23p}$, 共 4 项。

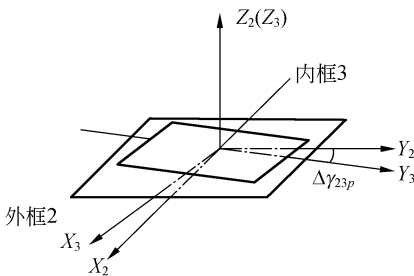


图 5 外框与内框 X、Y 向垂直度误差

Fig. 5 X to Y orthogonality error between outer and inner

4.1.2 相交度误差

本装置用于对摆心位置的校准,轴系的相交度无疑对测量值会产生影响。本文所提及的相交度为三个方向相交度误差的合量。如图 6 所示,外框与升降台的相交度误差 D_{12p} 分解成 Δx_{12p} , Δy_{12p} , Δz_{12p} 。再加上外框与内框的相交度误差 Δx_{23p} , Δy_{23p} , Δz_{23p} , 共 6 项。

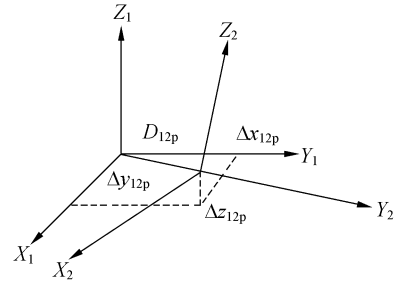


图 6 外框与升降台相交度误差

Fig. 6 Axis intersection error between outer and lifting table

4.1.3 喷管的安装同轴度误差

喷管模型为几何标准件,安装时近似的只考虑喷管轴线与内框法线的同轴度误差 A_{34p} 。将其分解成 X、Y 两个方向上的分量,如图 7 所示。包括 Δx_{34p} , Δy_{34p} , 共 2 项。

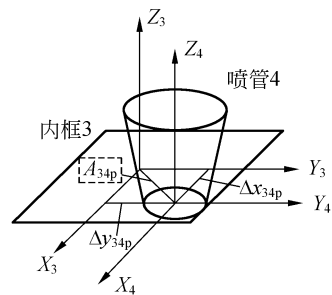


图 7 喷管与内框安装的同轴度误差

Fig. 7 Coaxiality error between nozzle model and inner

4.2 直线升降误差和轴系回转误差

4.2.1 直线升降误差

升降运动产生的误差主要有:竖直位移方向上的 XZ 面内和 YZ 面内的直线度误差;还有三个方向的角摆误差。分别为 $\Delta\alpha_{01s}$, $\Delta\beta_{01s}$, $\Delta\gamma_{01s}$, Δx_{01s} , Δy_{01s} 等 5 项误差。Z 向的位移误差由光栅的测量精度决定。

4.2.2 轴系回转误差

内外框的旋转产生的误差主要由轴系回转误差决定。在任一瞬时,轴系的主轴一方面绕自己的回转轴线旋转,另一方面此回转轴线同主轴一起相对转轴平均轴线做轴向的、径向的和倾角的运动。因此轴系回转误差也通常包括轴向、径向以及倾角回转误差。进一步分解得到两个纯径向误差、轴向跳动误差、以及两个方向的倾角回转误差。包括 $\Delta\beta_{12s}, \Delta\gamma_{12s}, \Delta x_{12s}, \Delta y_{12s}, \Delta z_{12s}, \Delta\alpha_{23s}, \Delta\gamma_{23s}, \Delta x_{23s}, \Delta y_{23s}, \Delta z_{23s}$, 共 10 项。

4.3 直线位移和旋转角度的测量误差

直线位移和旋转角度的测量误差大小直接影响最终的测量结果。其测量误差取决于光栅和编码器的精度 $\delta\theta_1$ 和安装误差 $\delta\theta_2$ 。综合测量精度:

$$\delta\theta = \sqrt{\delta\theta_1^2 + \delta\theta_2^2}, \quad (14)$$

此项误差共包括 3 项, $\Delta z_{01s}, \Delta\alpha_{12s}, \Delta\beta_{23s}$ 。

5 仿真研究

校准视觉测试系统的过程分为三步,首先是校准装置分别通过绕 X、Y 两轴的单轴摆动来校准视觉测试系统,这是整个校准过程的基础,因为单转运动最简单而且校准装置的累积误差小。然后是同时绕 X、Y 两轴转动,基本可以模拟火箭喷管的运动,检验视觉测试系统对二维空间摆动的测量效果。最后是双轴联动加上竖直升降,可以完全模拟火箭喷管的运动。

本文的仿真主要研究的是指向误差和喷管摆心位置误差在双轴摆动范围内的变化规律,因此假设无升降运动。设升降台的初始位置 $z_0 = 1.5 \text{ m}, z = 0$,忽略升降台的运动误差,这样只剩下 24 项误差。下面将对指向误差和摆心位置误差的分布,以及它们对主要误差的敏感度进行仿真实验。

5.1 指向误差和摆心位置误差的分布

负载喷管的情况下,校准装置的俯仰角 α 在 $[0, 90^\circ]$ 变化,偏航角在 $[0, 30^\circ]$ 变化。设垂直度误差为 $5''$,回转倾角误差为 $5''$,回转的径向和轴向跳动为 $3 \mu\text{m}$,相交度误差为 $10 \mu\text{m}$,喷管安装同轴度误差为 $10 \mu\text{m}$,角度测量误差为 $5''$,则指向误差分布的仿真结果如图 8 所示。A 点取最大值为 $13.1''$,位于 $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$; B 取最小值为 $9.4''$,位于 $\alpha = 0^\circ, \beta = 30^\circ$ 。摆心位置误差的分布仿真结果如图 9 所示, C 取最大值为 $23.0 \mu\text{m}$,位于 $\alpha =$

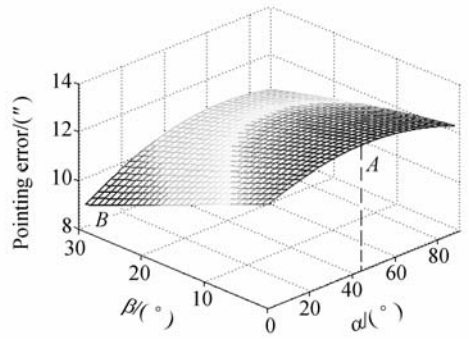


图 8 指向误差的分布

Fig. 8 Distribution of pointing error

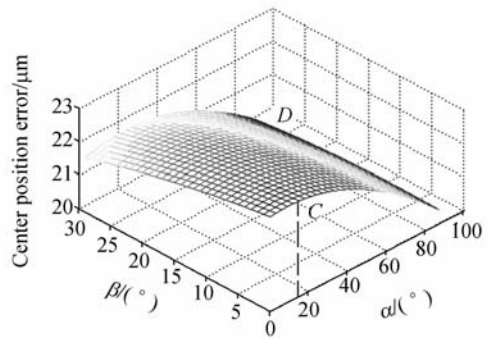


图 9 摆心位置误差的分布

Fig. 9 Distribution of center position error

$15^\circ, \beta = 0^\circ, D$ 取最小值为 $20.6 \mu\text{m}$,位于 $\alpha = 90^\circ, \beta = 30^\circ$ 。

5.2 指向误差分析

5.2.1 指向误差对垂直度误差、回转倾角误差、角度测量误差的敏感度分析

分别考虑单独存在垂直度、回转倾角误差、角度测量误差时(均取 $5''$),对指向误差的影响。这里的指向误差为平均指向误差,其值为运动范围内指向误差的均方根。

表 2 指向误差对主要误差源的敏感度

Tab. 2 Pointing error sensitivity to main error

垂直度误差	角度测量误差	倾角误差	平均指向误差
$5''$	0	0	$4.3''$
0	$5''$	0	$3.9''$
0	0	$5''$	$3.6''$

由表 2 的仿真结果可知,指向误差对垂直度最为敏感,其次为角度测量误差,再次为回转的倾

角误差。由于选用的编码器的综合角度测量误差可达到 5", 而倾角误差一般为 5~15", 垂直度误差在 5~25" 变化。结合指向误差对三者的敏感度(指向误差随三者线性变化), 不难看出实际上垂直度误差对指向误差影响最大。

5.2.2 垂直度误差对指向误差的影响

由于指向误差对垂直度误差最敏感, 则考察当角度测量误差取最大值 5", 倾角误差分别取 5、10、15" 时, 垂直度误差对指向误差的影响。仿真结果如图 10 所示, 平均指向误差随垂直度误差和倾角误差的增大而线性增大, 其值在 [11.6", 38.8"] 变化。由于设计的视觉系统测试角度的不确定度在 100" 左右, 用于校准的平均指向误差应控制在 20" 内(视觉测试系统不确定度的 1/5)。由图 10 可知, 当倾角误差取 5" 时, 垂直度误差误差应控制在 15" 以内。

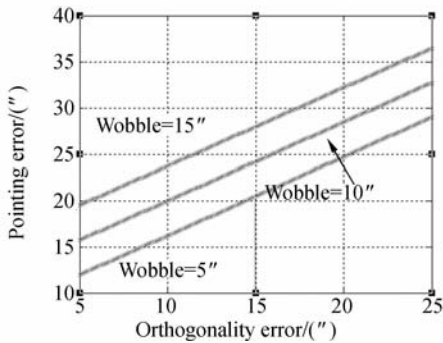


图 10 垂直度对指向误差的影响

Fig. 10 Pointing error sensitivity to orthogonality error

5.3 摆心位置误差分析

5.3.1 摆心位置误差对轴系间的相交度、喷管安装同轴度以及径向和轴向跳动误差的敏感度分析

分别考虑单独存在相交度、径向和轴向跳动、以及负载安装的同轴度时, 对摆心位置误差的影响。这里的摆心位置误差也为转角范围内的平均摆心位置误差。相交度按式(15)在三个坐标轴方向分解, 同轴度按式(16)在 X、Y 两个方向分解。

$$\Delta x_{ijp} = \Delta y_{ijp} = \Delta z_{ijp} = \frac{\sqrt{3}}{3} D_{ijp}, \quad (15)$$

$$\Delta x_{34p} = \Delta y_{34p} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{34p}. \quad (16)$$

由表 3 的仿真结果可知, 摆心位置误差对轴系间的相交度最为敏感, 径向和轴向跳动以及负载安装的同轴度的影响相对较弱。

表 3 摆心位置误差对主要误差源的敏感度

Tab. 3 Center position error sensitivity to main error

相交度	径向轴向跳动	负载同轴度	平均摆心位置误差
10 μm	0	0	11.3 μm
0	3 μm	0	6.0 μm
0	0	10 μm	5.7 μm

5.3.2 相交度误差对摆心位置误差的影响

径向及轴向跳动取最大值 3 μm, 负载同轴度分别取 10、50、90 μm, 仿真结果如图 11 所示, 摆心位置误差随轴系间相交度和负载同轴度的增大而线性增大, 其值在 [22.1 μm, 163.1 μm] 变化。由于设计的视觉系统测试位移的不确定度在 0.5 mm 左右, 用于校准的摆心位置误差应控制在 100 μm 内(视觉测试系统不确定度的 1/5), 由图 11 可知, 当喷管安装同轴度误差取 10 μm 时, 相交度误差应控制在 80 μm 以内。

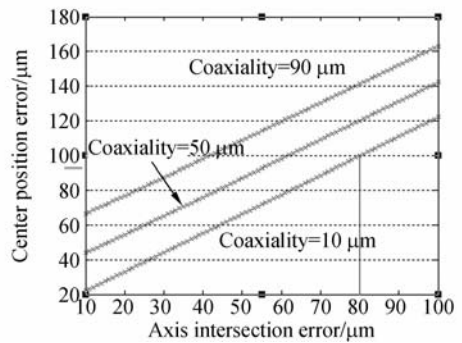


图 11 相交度对摆心位置误差的影响

Fig. 11 Center position error sensitivity to axis intersection error

6 结 论

设计了一种火箭喷管三维运动测试的校准装置, 该装置可模拟火箭喷管运动, 并提供标准的运动参数。运用多体系统运动误差理论, 推导了校准装置的指向误差和摆心位置误差的模型, 分析了模型中的 30 项几何误差源。通过仿真实验,

得出校准装置在转角范围内的误差分布。指向误差最大值位于 $\alpha=45^\circ, \beta=0^\circ$, 摆心位置误差最大值位于 $\alpha=15^\circ, \beta=0^\circ$ 。由敏感度分析得出: 指向误差对垂直度最为敏感; 摆心位置误差对轴系间

的相交度最为敏感。为满足校准精度的要求, 指向误差的主要误差源垂直度误差应控制在 $15''$ 以内; 摆心位置误差的主要误差源相交度误差应控制在 $80 \mu\text{m}$ 以内。

参考文献:

- [1] SUTTON G. *Rocket Propulsion Elements: an Introduction to the Engineering of Rockets*[M]. New York: Wiley, 1992.
- [2] CAO W P, BI W, CHE R SH. 6-DOF motion and center of rotation estimation based on stereo vision [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2008, 21(2): 87-92.
- [3] YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 883-890.
- [4] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(10): 9261-2361.
- WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line array CCD camera based on exact measuring angle in lab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 9261-2361. (in Chinese)
- [5] 刘万里, 王占奎, 曲兴华, 等. 激光跟踪测量系统跟踪转镜的误差分析[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(4): 585-590.
- LIU W L, WANG ZH K, QU X H, et al.. Error analysis of tracking mirror for laser tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 585-590. (in Chinese)
- [6] 粟时平, 李圣怡, 王贵林. 多轴数控机床的通用运动学综合空间误差模型[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(4): 45-50.
- SU SH P, LI SH Y, WANG G L. A universal synthetic volumetric error model of multi-axis NC ma-

- chine tool based on kinematics[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2001, 23(4): 45-50. (in Chinese)
- [7] 李岩, 范大鹏. 基于多体系统运动学理论的三轴转台装配误差建模分析[J]. *兵工学报*, 2007, 28(8): 981-987.
- LI Y, FAN D P. Error analysis of three-axis turntable aimed at assembling based on multi-system kinematics Theory[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(8): 981-987. (in Chinese)
- [8] 曲智勇, 陈维山, 姚郁. 某型六自由度运动系统误差建模[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(9): 1345-1349.
- QU ZH Y, CHEN W SH, YAO Y. Error model of a certain 6-DOF motion system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(9): 1345-1349. (in Chinese)
- [9] Louis A DeMore. Design study for a high-accuracy three-axis test table [J]. *J Guidance*, 1985, 10(1): 318-333.
- [10] 金光, 王家骥, 倪伟. 星体弧长法标定光电经纬仪指向精度[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(4): 91-95.
- JIN G, WANG J Q, NI W. Calibration of pointing accuracy with electro-optic phototheodolites by the star arc-length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(4): 91-95. (in Chinese)
- [11] 肖卫国, 郝崇恩, 李高凤. 三轴飞行模拟转台误差研究[J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(5): 678-680.
- XIAO W G, HAO CH E, LI G F. Research on error for a three-axis flight simulation turntable [J]. *Journal of System Simulation*, 2001, 13(5): 678-680. (in Chinese)

作者简介:



刘 博(1979—), 男, 辽宁锦州人, 博士研究生, 主要研究方向为立体视觉运动量测量及其校准装置和校准技术。E-mail: liubohit@sohu.com

叶 东(1968—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为基于串/并联结构的坐标测量理论和技术, 双目/单目视觉坐标测量理论和技术等。E-mail: yedong@hit.edu.cn

导师简介:

车仁生(1939—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事仿生计量学, 视觉静态与动态三维测试技术, 虚拟现实技术与仪器等方面的研究。E-mail: crs@hit.edu.cn